

单旭东, 石琳, 田帅, 等. 玉米秸秆还田后磷肥减量对冬小麦磷素积累量和产量的影响[J]. 江苏农业学报, 2021, 37(4): 884-892.
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2021.04.010

玉米秸秆还田后磷肥减量对冬小麦磷素积累量和产量的影响

单旭东, 石琳, 田帅, 王擎运, 郜红建

(农田生态保育与污染防控安徽省重点实验室/长江经济带磷资源高效利用与水环境保护中心/安徽农业大学资源与环境学院, 安徽 合肥 230036)

摘要: 旨在探究玉米秸秆还田后秸秆磷肥替代化学磷肥的适宜比例, 为秸秆还田后磷肥的合理施用提供理论依据。通过 2 年的田间试验, 研究玉米秸秆粉碎还田条件下配方施肥及磷肥减量 10%、20%、30% 处理对小麦磷吸收累积量、产量及养分利用效率的影响。结果表明, 在 2019、2020 年, 土壤中速效磷含量随着小麦生育期的推进呈现先减少后增加的趋势, 土壤中磷净投入量随着磷肥投入量的递减而递减。2019、2020 年, 在玉米秸秆还田条件下, 与配方施肥磷肥处理 (P100) 相比, 磷肥减量 20% 处理 (P80) 分别使小麦成熟期磷素的总累积量提高了 43.11%、22.42%, 分别使小麦增产 7.68%、4.90%; 与配方施肥磷肥处理 (P100) 相比, 磷肥减量 10% 处理 (P90) 分别使小麦成熟期磷素的总累积量提高 5.55%、6.75%, 分别使小麦产量增加 1.60%、1.65%; 与配方施肥磷肥处理 (P100) 相比, 磷肥减量 30% 处理 (P70) 分别使小麦成熟期磷素总累积量降低 8.11%、9.07%, 分别使小麦产量降低 5.44%、10.89%。2019、2020 年, 在玉米秸秆还田条件下, 与配方施肥磷肥处理 (P100) 相比, 磷肥减量 20% 处理 (P80) 能够显著提高磷肥的农学效率 (5.73%~39.87%)、偏生产力 (20.07%~20.85%) 和磷素吸收利用率 (32.78%~42.11%) ($P<0.05$)。可见, 玉米秸秆还田后磷肥减量 20% 以内对后茬小麦产量不会产生明显影响, 并且能够提高磷肥的吸收利用效率, 实现减肥增效。

关键词: 玉米秸秆还田; 磷肥减量; 小麦产量; 磷肥利用效率

中图分类号: S141.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2021)04-0884-09

Effects of phosphate fertilizer reduction on phosphorus accumulation and yield of winter wheat after maize straw returning

SHAN Xu-dong, SHI Lin, TIAN Shuai, WANG Qing-yun, GAO Hong-jian

(Anhui Provincial Key Laboratory of Farmland Conservation and Pollution Prevention, Research Centre of Phosphorous Efficient Utilization and Water Environment Protection Along the Yangtze River Economic Belt, School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

Abstract: The research aimed to explore the rational proportion of phosphorus in straw to replace chemical phosphorus after the maize straw returned to the field, so as to provide theoretical foundation for rational use of phosphate fertilizer after the maize straw incorporation. The effects of recommended fertilization and phosphorus reduced by 10%, 20% and 30% on phosphorus absorption and accumulation, grain yield and nutrient utilization efficiency of winter wheat under maize

straw incorporation condition were investigated through a two-year field experiment. The results showed that, in 2019 and 2020, the content of available phosphorus in soil decreased first and then increased with the extension of the wheat growth period, and the net input of phosphorus in soil declined with the decrease of phosphorus fertilizer addition. In 2019 and 2020, compared with the recommen-

收稿日期: 2020-12-14

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFD0800301); 国家自然科学基金项目 (41877099); 安徽省重大科技专项 (1803071188)

作者简介: 单旭东 (1995-), 男, 安徽蚌埠人, 硕士研究生, 主要从事养分高效利用研究。 (E-mail) 1612146732@qq.com

通讯作者: 郜红建, (E-mail) gaohongjian2@163.com

ded phosphate fertilizer treatment (P100), the treatment of reducing phosphate fertilizer by 20% (P80) increased the total phosphorus accumulation in wheat plants of mature period by 43.11% and 22.42%, increased the wheat yield by 7.68% and 4.90% under the condition of returning maize straw to field. Compared with those in the recommended phosphate fertilizer treatment (P100), the total accumulation of phosphorus in mature wheat plant increased by 5.55% and 6.75%, and the wheat yield increased by 1.60% and 1.65% in the treatment of reducing the phosphorus fertilizer by 10% (P90) in 2019 and 2020, respectively. Compared with those in the recommended phosphate fertilizer treatment (P100), the total accumulation of phosphorus in mature wheat plant reduced by 8.11% and 9.07%, the wheat yield reduced by 5.44% and 10.89% in the treatment of reducing the phosphorus fertilizer by 30% (P70) in 2019 and 2020, respectively. Compared with those in the recommended phosphate fertilizer treatment (P100), the agronomic efficiency of phosphorus fertilizer significantly increased by 5.73%–39.87%, the partial productivity significantly increased by 20.07%–20.85%, and the phosphorus absorption and utilization rate significantly increased by 32.78%–42.11% ($P<0.05$) in the treatment of reducing the phosphate fertilizer by 20% (P80) under the condition of returning maize straw to field in 2019 and 2020, respectively. It can be seen that the reduction of phosphate fertilizer within 20% after maize straw returning will not have obvious impact on the yield of later wheat, and can improve the absorption and utilization efficiency of phosphate fertilizer to realize phosphate fertilizer reduction and utilization efficiency increase.

Key words: maize straw returning; phosphate fertilizer reduction; wheat yield; utilization efficiency of phosphate fertilizer

磷素是小麦生长发育和产量形成过程中必不可少的营养元素^[1-3],土壤中的磷60%~80%以无机态的形式存在^[4],包括矿物态磷、吸附态磷和土壤溶液中的可溶性磷。土壤中的有机磷需要分解为无机磷(H_2PO_4^- 和 HPO_4^{2-})后方能被植物利用^[5]。王永壮等^[6]研究发现,中国土壤中平均总磷、速效磷含量分别为0.68 g/kg、12.89 mg/kg。磷肥在土壤中通过物理化学反应转化为易被土壤矿物质吸附或被微生物固持的磷酸盐,而使有效态磷含量降低^[7-8]。研究发现,中国磷肥的当季利用率只有10%~25%^[9]。土壤缺磷会导致作物养分不平衡,从而引起减产;而磷肥施用量过高,易造成淋失风险^[10-12]。中国《第二次全国污染源普查公报》显示,在农业面源污染的排放总量中,总磷排放量占8.67%^[13]。

中国磷矿资源储量丰富,但区域分布极不均衡,且面临着难采难选矿多、贫矿多、富矿少的难题^[14-16]。提高磷肥利用效率和挖掘替代磷矿资源的潜力,是实现磷资源可持续利用的重要途径。中国秸秆综合利用潜力总量为 8.76×10^8 t,秸秆中的磷素储量折合纯磷(P_2O_5)约为 0.419×10^{11} t,是一种很好的化学磷肥替代资源^[17]。秸秆还田能够改善土壤肥力、提高土壤微生物活性、增加土壤有效磷含量,进而增加作物产量^[18-20]。Kashif等^[21]通过研究指出,秸秆还田后土壤的速效磷含量比秸秆还田前增加了69.80%~82.80%;王秀娟等^[22]研究发现,在

秸秆还田条件下,磷肥减量20%时,磷素利用率提高了5.73%;段转宁等^[23]研究发现,在油菜秸秆全量还田条件下,磷肥减量50%时,水稻可以吸收充足的磷素来满足其生长发育的需要。

前人的研究多侧重于秸秆还田对土壤养分变化规律和作物产量的影响,但是关于秸秆还田后不同磷肥减量比例对作物产量和磷素吸收利用效率影响的研究较少。本研究在田间试验的基础上,探讨秸秆还田及磷肥减量10%、20%、30%后小麦植株磷素含量和累积量以及土壤中速效磷含量的变化规律,分析不同磷肥减量比率对小麦产量及磷肥利用率的影响,以期为玉米秸秆还田后科学施用磷肥提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点

田间定位试验于2019–2020年在安徽省宿州市埇桥区灰古镇安徽农业学院北综合试验站(地理位置为117°08'E、33°68'N)开展,该地区属暖温带半湿润气候,日照雨水充裕,排灌便利,有利于小麦种植。试验田农业生产以小麦–玉米轮作制为主,土壤类型为砂姜黑土,土壤有机质含量为18.06 g/kg,全氮含量为1.09 g/kg,碱解氮含量为149.45 mg/kg,速效磷含量为6.04 mg/kg,速效钾含量为133.50 mg/kg,pH值为8.09。

1.2 试验设计

用于试验的小麦品种为烟农 19, 施用的肥料含有尿素(含 46% N)、过磷酸钙(含 12% P_2O_5) 和氯化钾(含 60% K_2O)。试验设不施磷肥(N : P_2O_5 : K_2O = 225 kg/hm² : 0 kg/hm² : 90 kg/hm²) (CK)、配方施肥(N : P_2O_5 : K_2O = 225 kg/hm² : 120 kg/hm² : 90 kg/hm²) (P100)、磷肥减量 10% (N : P_2O_5 : K_2O = 225 kg/hm² : 108 kg/hm² : 90 kg/hm²) (P90)、磷肥减量 20% (N : P_2O_5 : K_2O = 225 kg/hm² : 96 kg/hm² : 90 kg/hm²) (P80) 和磷肥减量 30% (N : P_2O_5 : K_2O = 225 kg/hm² : 84 kg/hm² : 90 kg/hm²) (P70) 共 5 个处理, 每个处理设 3 次重复。小区采用随机区组排列方法, 单个小区面积为 6.4 m×35.0 m, 小区与小区之间均作 60 cm 的田埂。所有处理的磷钾肥一次性基施, 氮肥按 6 : 4 的比例用于基肥和追肥。小麦于 10 月 24 日播种, 次年 2 月 17–18 日进行追肥, 6 月上旬收获, 成熟期每个小区取 4 m² 的小麦植株进行测产。除施肥量参照每个处理的要求外, 每个小区采用相同的管理方法, 病虫草害管理方法同大田。

1.3 供试条件

试验地的耕作制度为小麦-玉米轮作, 玉米品种为郑单 958, 玉米季配方施肥处理的磷肥用量为 90 kg/hm², 磷肥减量处理的减量比例分别为 10%、20%、30%, 磷肥施用量分别为 81 kg/hm²、72 kg/hm²、63 kg/hm²。所有处理中的秸秆全部粉碎后旋耕还田, 根据本试验中小麦、玉米的产量及谷草比, 可以估算出秸秆还田量。

1.4 测定项目与方法

植株样品的采集时间与土壤样品的采集时间一致。在小麦生长的苗期、拔节期、抽穗期、成熟期分别从每个小区随机取代表性植株样品, 冲洗干净并用蒸馏水润洗后, 将茎、叶、穗分别装入信封中, 先于 105 ℃ 杀青, 再于 75 ℃ 烘干至恒质量, 随即称质量, 由于成熟期的叶片易脱落, 因此将该时期的叶与茎混合烘干。土壤样品采自耕层(0~20 cm), 每个处理设 3 个重复, 每个重复随机用土钻取 5 个点的土体并混合为 1 个土壤样品, 风干、混匀后按四分法取部分样品, 研磨过 2 mm 网筛后测定土壤中的速效磷含量。

将烘干的植株粉碎充分后用浓硫酸、过氧化氢

消煮, 再用钒钼黄比色法测定植株的全磷含量, 用半微量凯氏定氮法测定植株的全氮含量, 土壤速效磷含量用碳酸氢钠浸提法测定, 植株磷素累积量及磷肥利用效率等的计算方法如下:

磷素总累积量(g, 1 株) = 茎磷素累积量 + 叶磷素累积量 + 穗磷素累积量; 磷肥偏生产力(kg/kg) = 施磷肥区小麦产量/施磷量; 磷肥吸收利用率 = (施磷肥区作物磷素总累积量 - 不施磷肥区作物磷素总累积量)/施磷量 × 100%; 磷肥贡献率 = (施磷肥区作物产量 - 不施磷肥区作物产量)/施磷肥区作物产量 × 100%; 磷肥农学效率(kg/kg) = (施磷肥区作物产量 - 不施磷肥区作物产量)/施磷量; 土壤中磷净投入量 = 磷素投入总量 - 籽粒磷累积量; 磷素投入总量 = 化肥磷投入量 + 秸秆磷投入量; 籽粒磷累积量 = 籽粒磷含量 × 产量。

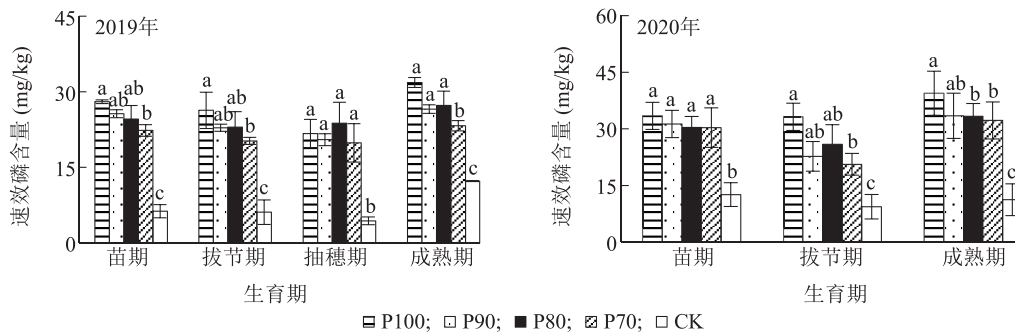
1.5 统计分析

用 Excel 2007 进行数据处理和作图, 用 SPSS 20.0、Duncan's 法进行统计和差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 小麦不同生育期土壤速效磷含量的变化规律

由图 1 可以看出, 在 2019、2020 年, 随着生育期的推进, 不同处理的土壤速效磷含量整体呈先减少后增加的趋势, 且 2020 年小麦不同生育期的土壤速效磷含量比 2019 年的高; 在 2019、2020 年小麦的不同生育期, 土壤速效磷含量均为 CK 处理最低, P100 处理较高; 在 2019 年小麦苗期, 不同磷肥减量处理的土壤速效磷含量以 P70 处理最低, 并与 P100 处理间的差异达到显著水平 ($P < 0.05$); 在 2020 年小麦苗期与成熟期, 不同磷肥减量处理的土壤速效磷含量随着施磷量的减少而逐渐减少, 并且呈现 $P100 > P90 > P80 > P70$ 的规律; 在 2019 年小麦拔节期, 以 P70 处理的土壤速效磷含量最低, P100 处理最高, 两者之间的差异达显著水平 ($P < 0.05$); 在 2020 年小麦拔节期, 不同磷肥减量处理的土壤速效磷含量呈 $P100 > P80 > P90 > P70$ 的规律, 但后三者之间的差异均未达到显著水平; 在 2019 年小麦成熟期, 不同磷肥减量处理的土壤速效磷含量呈 $P100 > P90 \approx P80 > P70$ 的规律, P90、P80、P70 处理之间差异不显著; 在 2019、2020 年, 各磷肥减量处理的土壤速效磷含量均显著高于不施磷肥 (CK) 处理 ($P < 0.05$), 但多数磷肥减量处理之间的差异不显著。



同一生育期不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。CK、P70、P80、P90、P100 分别表示不施磷肥对照、磷肥减量 30%、磷肥减量 20%、磷肥减量 10% 和磷肥不减量。

图 1 秸秆还田条件下磷肥减量对小麦不同生育期土壤速效磷含量的影响

Fig.1 Effects of phosphorus fertilizer reduction on soil available phosphorus content at different growth stages of wheat under the condition of returning straw to the field

2.2 小麦不同生育期植株磷素、氮素含量

由表 1 可以看出,2019、2020 年,小麦抽穗期、成熟期茎、叶、穗中的磷含量以 P80 处理最高,以不施用磷肥的 CK 处理最低;磷含量整体上以穗中最高,小麦植株不同部位的磷含量随着磷肥施用量的减少而呈现先增后减的规律;在 2019 年小麦苗期,小麦植株磷含量呈 P100>P90>P80>P70>CK 的规律,且 P100 处理与 P80、P70、CK 处理间的差异达到显著水平 ($P<0.05$);在 2020 年小麦苗期,小麦植株磷含量呈 P100>P80>P90>P70>CK 的规律,且 P100 处理与其他处理

之间的差异达到显著水平 ($P<0.05$);在 2019、2020 年小麦拔节期,小麦植株磷含量均以 P80 处理最高,CK 处理最低;在 2019 年小麦成熟期,小麦植株茎+叶、穗中总磷含量以 P80 处理最高,与除 P90 处理外的其他处理间的差异达到显著水平 ($P<0.05$);2020 年小麦成熟期穗中磷含量呈现 P80>P90>P100>P70>CK 的规律;2019 年小麦成熟期 P80 处理小麦穗中磷含量分别比 P100、P90、P70、CK 处理高 20.06%、3.11%、20.73%、29.43%,其中 P80、P90 处理与 P100、P70、CK 处理之间有显著差异 ($P<0.05$)。

表 1 秸秆还田条件下磷肥减量对不同生育期小麦植株磷含量的影响

Table 1 Effects of phosphorus fertilizer reduction on phosphorus content in wheat at different growth stages under the condition of returning straw to the field

年份	处理	苗期植株磷含量 (g/kg)	拔节期植株磷含量 (g/kg)	抽穗期磷含量 (g/kg)			成熟期磷含量 (g/kg)	
				茎	叶	穗	茎+叶	穗
2019	P100	2.21±0.13a	3.10±0.25ab	1.10±0.59a	0.72±0.11ab	2.19±0.25b	3.49±0.08b	3.59±0.04b
	P90	2.02±0.45ab	3.32±0.14ab	1.31±0.03a	0.78±0.02ab	2.56±0.65a	3.97±0.07ab	4.18±0.27a
	P80	1.65±0.08b	3.64±0.24a	1.59±0.05a	0.96±0.04a	2.60±1.48a	4.20±0.32a	4.31±0.63a
	P70	1.56±0.13b	3.12±0.17ab	0.88±0.08b	0.65±0.03b	2.10±0.43b	3.48±0.12b	3.57±0.54b
	CK	1.21±0.26c	2.41±0.35c	0.86±0.03b	0.43±0.06c	1.47±0.01c	3.00±0.09c	3.33±0.06b
2020	P100	2.85±1.03a	3.70±1.37a				3.53±0.08ab	3.61±0.08ab
	P90	1.24±0.23b	3.52±1.07ab				3.81±0.08a	4.22±0.08a
	P80	1.76±0.66b	3.93±1.63a				4.12±0.08a	4.43±0.08a
	P70	0.73±0.14c	2.52±1.04b				3.50±0.08ab	3.21±0.08b
	CK	0.61±0.04c	2.30±0.55c				1.59±0.08c	2.31±0.08c

CK、P70、P80、P90、P100 见图 1 注。同一年份同列数据后标有不同小写字母的表示在 0.05 水平差异显著。

由表 2 可以看出,2019、2020 年,小麦不同生育期、不同部位的氮含量整体上以 P80 处理最高,CK

处理最低。在 2019 年小麦苗期,植株中的氮含量呈 P80>P90>P100>P70>CK 的规律,CK 处理与除 P70

处理外的其他处理之间的差异达到显著水平 ($P < 0.05$); 在 2020 年小麦苗期, 植株中的氮含量以 P80 处理最高, 且 P80 处理与除 P90 处理外的其他处理之间差异显著 ($P < 0.05$)。在 2019、2020 年小麦拔节期, 大部分处理植株中的氮含量较上一时期有所

升高, 且均以 P80 处理最高, CK 处理最低, 两者之间的差异达显著水平 ($P < 0.05$)。在 2019、2020 年小麦成熟期, 小麦植株茎+叶中的氮含量呈 P80>P90>P100>P70>CK 的规律。

表 2 秸秆还田条件下磷肥减量对不同生育期小麦植株氮含量的影响

Table 2 Effects of phosphorus fertilizer reduction on nitrogen content in wheat at different growth stages under the condition of returning straw to the field

年份	处理	苗期植株氮含量 (g/kg)	拔节期植株氮含量 (g/kg)	抽穗期氮含量 (g/kg)			成熟期氮含量 (g/kg)	
				茎	叶	穗	茎+叶	穗
2019	P100	17.36±3.54a	26.64±3.51a	7.84±1.46ab	19.87±0.98a	13.89±0.60a	26.01±0.08b	24.99±2.96ab
	P90	17.87±2.80a	25.62±0.85ab	8.17±0.96ab	19.57±0.60a	11.55±0.20b	29.99±0.07ab	21.33±0.93ab
	P80	18.32±1.62a	30.24±1.20a	10.07±0.09a	19.20±0.30a	14.46±1.23a	36.98±0.32a	29.45±2.30a
	P70	14.16±1.88ab	23.32±2.21ab	9.65±0.12a	13.48±1.36ab	12.86±0.94a	24.48±0.12b	20.55±6.88b
	CK	13.32±0.87b	19.94±1.95b	7.45±2.39b	10.47±1.51b	12.09±0.83ab	17.53±0.09c	20.19±1.46b
2020	P100	24.61±5.59b	27.34±3.32a				29.98±1.24b	21.32±2.00a
	P90	25.65±4.21ab	22.91±0.97ab				30.77±3.24ab	19.60±2.58ab
	P80	33.41±4.38a	35.53±1.75a				41.32±2.47a	25.91±0.94a
	P70	22.90±3.66b	26.82±9.21ab				25.52±1.24b	17.45±2.56b
	CK	20.08±6.24b	19.54±4.24b				13.03±2.54c	10.19±1.86c

CK、P70、P80、P90、P100 见图 1 注。同一年份不同处理间标有不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。

由表 3 可以看出, 2019、2020 年不同处理植株中的平均氮磷比排序为 P80 (7.84) > P100 (7.19) > P70 (6.40) > P90 (6.28) > CK (5.96)。

表 3 秸秆还田条件下磷肥减量对成熟期小麦植株氮磷比的影响

Table 3 Effects of phosphorus fertilizer reduction on the ratio of nitrogen to phosphorus at mature stage of wheat under the condition of returning straw to the field

年份	P100	P90	P80	P70	CK
2019	7.20	6.30	7.81	6.39	5.96
2020	7.18	6.27	7.86	6.40	5.95
平均	7.19	6.28	7.84	6.40	5.96

CK、P70、P80、P90、P100 见图 1 注。

2.3 小麦不同生育期的磷累积量

由图 2 可以看出, 磷累积量随小麦生育期的推进而逐渐增加, 在 2019 年小麦拔节期到抽穗期, 小麦植株磷累积速度放缓, 在成熟期达到最高值 (1 株 4.56~10.30 mg)。在不同生育期, 磷累积量均以 CK 处理最低, 且随着磷肥减量比例的提高而呈现先增加后降低的趋势。在 2019 年小麦苗期, 磷累积量以 P90 处理最高, 但与其他处理间无显著差异; 而

在 2020 年小麦苗期, 磷累积量以 P100 处理最高, 与 CK 处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

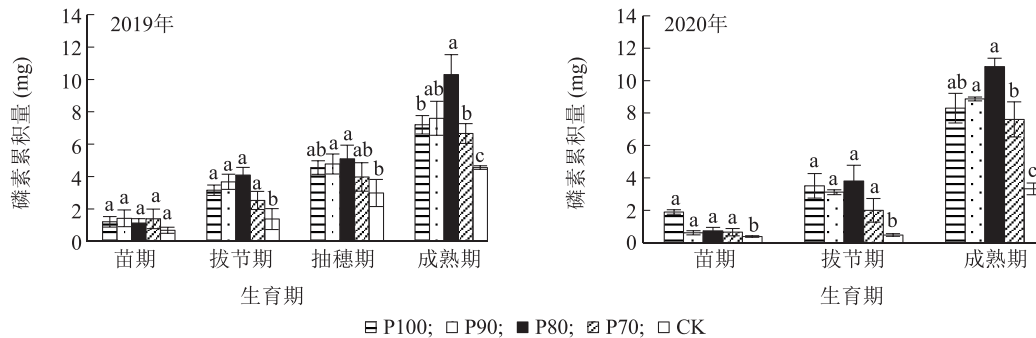
由图 2 还可以看出, 在 2019、2020 年小麦拔节期, 小麦植株磷累积量均以 P80 处理最高, 且与 CK 处理间差异显著 ($P < 0.05$), 可能由于当磷肥减量 20% 时, 小麦从土壤中吸收的磷较多, 导致在植株体内累积了较多磷。在 2019、2020 年成熟期, 小麦植株磷累积量均以 P80 处理最高, 2019 年 P80 处理的磷累积量分别比 P100、P90、P70 处理高 43.05%、35.53%、54.65%, 2020 年 P80 处理的磷累积量分别比 P100、P90、P70 处理高 30.81%、22.42%、42.71%。

2.4 小麦产量与磷利用效率

由表 4 可以看出, 除 P70 处理外, 2020 年其他处理的小麦产量均高于 2019 年。2019、2020 年不同处理的小麦产量呈 P80>P90>P100>P70>CK 的规律, 以 P80 处理的产量最高, CK 处理的产量最低, 两者之间有显著差异 ($P < 0.05$)。2019 年, 在不同磷肥减量处理下, 磷肥的贡献率、磷肥的农学效率和磷肥的吸收利用率呈 P80>P90>P100>P70>CK 的规律, P80 处理的磷肥偏生产力、磷肥贡献率、磷肥农学效率、磷肥吸

收利用率分别较 P100 处理高 20.85%、14.48%、39.87%、42.11%。在 2020 年,不同磷肥减量处理的磷肥贡献率、磷肥农学效率和磷肥吸收利用率呈 P80>P100>P90>P70 的规律,其中 P80 处理的磷肥偏生产

力、磷肥贡献率、磷肥农学效率、磷肥吸收利用率分别较 P100 处理高 20.08%、13.14%、5.73%、32.78%。2020 年 P80 处理的产量与 P100 处理间没有显著差异,与 CK 处理间差异显著($P<0.05$)。



同一生育期不同处理间标有不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。CK、P70、P80、P90、P100 见图 1 注。

图 2 秸秆还田条件下磷肥减量对不同生育期小麦植株磷素积累量的影响

Fig.2 Effects of phosphate fertilizer reduction under the condition of returning straw to the field on phosphorus accumulation of wheat at different growth stages

表 4 秸秆还田条件下玉米秸秆还田磷肥减量对小麦产量和磷素利用效率的影响

Table 4 Effects of phosphorus fertilizer reduction by returning corn stalks to the field on wheat yield and phosphorus utilization efficiency under the condition of returning straw to the field

年份	处理	磷肥偏生产力 (kg/kg)	磷肥贡献率 (%)	磷肥农学效率 (kg/kg)	磷肥吸收利用率 (%)	产量 (kg/hm ²)
2019	P100	71.33±2.12ab	14.02±0.02a	9.13±2.12ab	14.13±0.01b	7 039.87±254.82b
	P90	65.69±4.83ab	15.13±0.05a	11.46±4.83a	17.04±0.02ab	7 152.42±569.40ab
	P80	86.20±2.87a	16.05±0.02a	12.77±2.87a	20.08±0.03a	7 580.67±240.79a
	P70	61.84±5.93b	10.09±0.05a	8.04±5.93b	13.12±0.01b	6 656.83±522.17c
	CK	0	0	0	0	2 656.18±184.49d
2020	P100	73.01±7.07ab	16.21±0.14a	12.91±10.44a	17.51±0.11a	7 254.23±373.32ab
	P90	59.01±14.91c	15.78±0.22a	11.12±13.31ab	16.24±0.33ab	7 373.98±311.12a
	P80	87.67±28.79a	18.34±0.13a	13.65±5.01a	23.25±0.15a	7 609.41±278.13a
	P70	62.11±11.44b	11.32±0.21a	10.63±2.63b	15.21±0.31b	6 464.33±118.32c
	CK	0	0	0	0	2 818.53±114.52d

CK、P70、P80、P90、P100 见图 1 注。同一年份同列数据后标有不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。

2.5 小麦-玉米轮作秸秆还田、磷肥减量条件下土壤中磷的平衡分析

由表 5 可以看出,除 CK 处理外,2019、2020 年所有处理土壤中的磷均呈盈余状态。由表 6 可以看出,CK 处理的小麦籽粒磷总吸收量大于秸秆还田处理的磷投入总量,可能是降雨和灌溉水中的磷进入土壤所致^[24]。土壤中磷的净投入量随着磷肥投入量的减少而递减,2020 年不同减磷处理的小麦籽粒磷总吸收量、土壤中磷的净投入量整体上较 2019 年有所提高,这与本研究得出的土壤

速效磷含量、植株磷含量的变化规律较相似(图 1、图 2)。土壤中磷库因投入磷肥的种类和数量不同而存在差异^[25],Shen 等^[26]认为,土壤中磷的盈亏与速效磷含量变化的关系密切,施用磷肥提高了土壤中的磷盈余,而不施用磷肥导致土壤中的磷亏缺。秸秆还田在不造成土壤中磷大量盈余的情况下进一步提高了土壤中的速效磷含量,促进作物对土壤中磷的吸收利用,这可能与秸秆碳活化土壤磷库,促进土壤中的磷有效转化有关^[27]。笔者研究发现,随着磷肥施用量的减少,土壤中磷

的净投入量呈先增加后减少的趋势,这与赵亚南等^[28]的研究结果一致。

表 5 小麦-玉米轮作秸秆还田条件下磷肥减量土壤中磷的净投入量

Table 5 Net phosphorus input in phosphate fertilizer reduced soil under the condition of wheat and corn rotation and returning straw to the field

年份	处理	磷(P_2O_5)投入量 (kg/hm^2)		籽粒磷的总吸收量 (kg/hm^2)	土壤中磷的净投入量 (kg/hm^2)
		肥料磷的总投入量	秸秆中磷的总投入量		
2019	P100	210	24.12	61.85	172.27
	P90	189	25.95	62.19	152.76
	P80	168	28.10	69.21	126.89
	P70	147	22.45	50.43	119.02
	CK	0	7.36	20.13	—
2020	P100	210	33.49	63.99	179.50
	P90	189	37.01	64.45	161.56
	P80	168	40.36	73.65	134.71
	P70	147	27.93	49.07	125.86
	CK	0	4.21	20.02	—

CK、P70、P80、P90、P100 见图 1 注。

表 6 秸秆磷素投入和籽粒对磷素的累积量

Table 6 Straw phosphorus input and grain phosphorus accumulation

年份	处理	玉米秸秆还田总量 (kg/hm^2)	玉米产量 (kg/hm^2)	小麦秸秆还田总量 (kg/hm^2)	玉米秸秆含磷量 (kg/hm^2)	玉米籽粒含磷量 (kg/hm^2)	小麦秸秆含磷量 (kg/hm^2)
2019	P100	6 243.85	8 021.51	5 138.59	0.99	4.56	3.49
	P90	6 083.75	7 389.12	5 418.50	0.73	4.37	3.97
	P80	6 196.77	8 120.23	5 376.36	0.89	4.50	4.20
	P70	5 595.74	6 750.23	5 518.31	0.58	3.95	3.48
	CK	4 957.41	5 756.23	2 287.57	0.10	1.96	3.00
2020	P100	6 744.00	7 925.65	6 068.00	1.79	4.77	3.53
	P90	6 723.00	7 406.88	6 466.00	1.84	4.50	3.81
	P80	6 950.00	8 287.34	6 389.00	2.02	4.82	4.12
	P70	5 789.00	6 839.83	5 830.00	1.30	4.14	3.50
	CK	4 922.45	6 087.43	2 279.13	0.12	2.22	1.59

CK、P70、P80、P90、P100 见图 1 注。

3 讨论

3.1 玉米秸秆还田条件下磷肥减量对土壤速效磷含量和小麦磷累积量的影响

本研究发现,在秸秆还田条件下,土壤中的速效磷含量随着小麦生育期的推移呈先减少后增加的趋势,小麦中的磷积累量则随着生育期的推移而逐渐增加,在分蘖期、拔节期,配方施肥的小麦植株含磷量与其他磷肥减量处理间无显著差异,

而到成熟期,配方施肥处理小麦植株含磷量与磷肥减量 20% 处理间差异显著。姜宗庆等^[29]研究发现,小麦一生中磷积累总量的 70%~75% 是在拔节后吸收的,尤以孕穗至开花期的积累量最多。秸秆还田后,随着秸秆腐解时间的延长,秸秆中磷的释放率逐渐提高,腐解至 150 d 时,秸秆中磷的释放率达到 52.0%~68.9%^[30]。同时,秸秆腐解过程中产生大量氨基酸、有机酸等小分子物质,促进了土壤中难溶性磷的转化和释放,提高了土壤供

磷能力和磷的有效性,有利于小麦对磷的吸收累积^[27,31]。赵亚南等^[28]研究发现,适当减量施肥可以促进小麦中的干物质转运及其对籽粒灌浆的贡献,这与本研究结果一致。

3.2 玉米秸秆还田条件下磷肥减量对小麦产量的影响

本研究结果显示,当玉米秸秆还田后磷肥减量10%~20%时,小麦产量与P100处理间的差异不明显;当磷肥减量达到30%时,小麦产量显著低于P100处理($P<0.05$)。陈远学等^[32]认为,作物籽粒产量随着磷肥施用量的增加先增大后减少,适量施用磷肥可以促进作物生长,以施磷量75.0~112.50 kg/hm²为宜。张少民等^[33]研究发现,施磷能够显著增加小麦的干物质累积量,进而增加小麦产量,但施磷量超过这一范围后,增施磷肥会造成小麦产量下降。邢丹等^[34]研究发现,磷肥用量在一定范围内具有增产作用,合理的施磷量因土壤中的磷素状况而异,施磷提高了小麦产量,但千粒质量降低,因此磷肥用量存在一个合理阈值,这与本研究结果相似。在玉米秸秆还田条件下,磷肥减量达到30%时,玉米秸秆释放的磷不能完全替代减量的化学磷肥,造成小麦产量下降。前人研究发现,外源磷的增加会降低植株氮磷比,且随着土壤氮磷比的提高,作物生物量呈先增加后降低的趋势^[35-36]。张婷^[37]研究发现,小麦品种烟农19优质高产,抗旱节水性较强,具有较高的肥料利用率,其达到高产小麦植株标准的氮磷比约为8.20。本研究结果表明,2019、2020年在不同磷肥减量处理下,小麦的氮磷比呈现P80(7.84)>P100(7.19)>P70(6.40)>P90(6.28)>CK(5.96)的规律。由于在磷肥减量20%(P80)处理下,小麦的氮磷比(7.84)最接近供试小麦品种(烟农19)的最佳氮磷比(8.20),由此可见,在玉米秸秆还田条件下,磷肥减量20%处理(P80)的小麦产量较高。

4 结 论

在玉米秸秆还田条件下,小麦植株磷含量、磷累积量随着磷肥用量的减少整体上呈先增后减的变化规律,基本上以磷肥减量20%(P80)处理的小麦磷含量和磷累积量最高。在玉米秸秆还田条件下,当磷肥减量20%时,小麦穗中磷含量最高。在玉米秸秆还田条件下,磷肥减量20%(P80)处理的小麦产

量与配方磷肥处理(P100)相当,磷肥的偏生产力、磷肥的吸收利用率和磷肥的农学效率最高。从产量、磷肥利用效率等方面综合考虑,在玉米秸秆还田条件下,在配方磷肥施用基础上减量20%可实现减肥不减产。

参考文献:

- [1] DUNCAN E G, O'SULLIVAN C A, ROPER M M, et al. Yield and nitrogen use efficiency of wheat increased with root length and biomass due to nitrogen, phosphorus, and potassium interactions [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2018, 181(3): 364-373.
- [2] DEBICKA M, KOCOWICZ A, WEBER J, et al. Organic matter effects on phosphorus sorption in sandy soils [J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2016, 62(6): 840-855.
- [3] ZHANG R Q, LI C, FU K Y, et al. Phosphorus alters starch morphology and gene expression related to starch biosynthesis and degradation in wheat grain [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 10(8): 225-263.
- [4] 蒋柏藩,顾益初. 石灰性土壤无机磷分级体系的研究 [J]. *中国农业科学*, 1989, 22(3): 58-66.
- [5] BAI J H, YE X F, JIA J, et al. Phosphorus sorption-desorption and effects of temperature, pH and salinity on phosphorus sorption in marsh soils from coastal wetlands with different flooding conditions [J]. *Chemosphere*, 2017, 188(6): 677-688.
- [6] 王永壮,陈欣,史奕. 农田土壤中磷素有效性及影响因素 [J]. *应用生态学报*, 2013, 24(1): 260-268.
- [7] 向万胜,黄敏,李学垣. 土壤磷素的化学组分及其植物有效性 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2004, 10(6): 663-670.
- [8] WITHERS P J A, VAN DIJK K C, NESET T S S, et al. Stewardship to tackle global phosphorus inefficiency: the case of Europe [J]. *AMBIO*, 2015, 44(S2): 193-206.
- [9] 戴佩彬. 模拟条件下磷肥配施有机肥对土壤磷素转化迁移及水稻吸收利用的影响 [D]. 杭州:浙江大学, 2016.
- [10] BROCK E H, KETTERINGS Q M, KLEINMAN P J A. Phosphorus leaching through intact soil cores as influenced by type and duration of manure application [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2007, 77(3): 269-281.
- [11] 姚珊,张东杰, JAVKHLAN B, 等. 冬小麦-夏玉米体系磷效率对赋土磷素肥力的响应 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(6): 1640-1650.
- [12] 鲁如坤. 土壤磷素水平和水体环境保护 [J]. *磷肥与复肥*, 2003, 18(1): 4-8.
- [13] 刘钦普. 农田氮磷面源污染环境风险研究评述 [J]. *土壤通报*, 2016, 47(6): 1506-1513.
- [14] 马丽娜,沙景华,闫晶晶,等. 基于系统动力学的我国磷矿资源需求情景预测 [J]. *中国矿业*, 2020, 29(3): 33-39.
- [15] 孙小虹,陈春琳,王高尚,等. 中国磷矿资源需求预测 [J]. *地球*

- 学报, 2015, 36(2):213-219.
- [16] 薛珂, 张润宇. 中国磷矿资源分布及其成矿特征研究进展[J]. 矿物学报, 2019, 39(1):7-14.
- [17] 霍丽丽, 赵立欣, 孟海波, 等. 中国农作物秸秆综合利用潜力研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(13):218-224.
- [18] 张华艳, 牛灵安, 郝晋珉, 等. 秸秆还田配施缓控释肥对土壤养分和作物产量的影响[J]. 土壤通报, 2018, 49(1):140-149.
- [19] PATHAK H, SINGH R, BHATIA A, et al. Recycling of rice straw to improve wheat yield and soil fertility and reduce atmospheric pollution[J]. Paddy and Water Environment, 2006, 4(2):111-117.
- [20] GUPTA R K, LADHA J, SINGH J, et al. Yield and phosphorus transformations in a rice-wheat system with crop residue and phosphorus management[J]. Soil Science Society of America Journal, 2007, 71(5):1500-1507.
- [21] KASHIF A, WANG W Y, KHAN A, et al. Straw mulching with fertilizer nitrogen: an approach for improving crop yield, soil nutrients and enzyme activities[J]. Soil Use and Management, 2019, 35(3):526-535.
- [22] 王秀娟, 解占军, 何志刚, 等. 秸秆还田条件下减量施磷对玉米产量、磷素利用率及土壤磷含量的影响[J]. 河南农业科学, 2018, 47(8):39-44.
- [23] 段转宁, 陶诗顺, 张荣萍, 等. 油菜秸秆全量还田减磷栽培对杂交稻经济性性状及产量的影响[J]. 杂交水稻, 2017, 32(3):36-39.
- [24] 叶会财, 李大明, 黄庆海, 等. 长期不同施磷模式红壤性水稻土磷素变化[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(6):1521-1528.
- [25] 王昆昆, 廖世鹏, 任涛, 等. 连续秸秆还田对油菜水稻轮作土壤磷素有效性及作物磷素利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2020, 53(1):94-104.
- [26] SHEN P, XU M G, ZHANG H M, et al. Long-term response of soil Olsen P and organic C to the depletion or addition of chemical and organic fertilizers[J]. Catena Giessen Then Amsterdam, 2014, 118:20-27.
- [27] WEI T, ZHANG P, WANG K, et al. Effects of wheat straw incorporation on the availability of soil nutrients and enzyme activities in semiarid areas[J]. PLoS One, 2015, 10(4):e0120994.
- [28] 赵亚南, 宿敏敏, 吕阳, 等. 减量施肥下小麦产量、肥料利用率和土壤养分平衡[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(4):864-873.
- [29] 姜宗庆, 封超年, 黄联联, 等. 施磷量对小麦物质生产及吸磷特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(5):628-634.
- [30] 于寒, 谷岩, 梁烜赫, 等. 玉米秸秆腐解规律及土壤微生物功能多样性研究[J]. 水土保持学报, 2015, 29(2):305-309.
- [31] ZHU H H, WU J S, HUANG D Y, et al. Improving fertility and productivity of a highly-weathered upland soil in subtropical China by incorporating rice straw[J]. Plant and Soil, 2010, 331(1/2):427-437.
- [32] 陈远学, 李汉邯, 周涛, 等. 施磷对间套作玉米叶面积指数、干物质积累分配及磷肥利用效率的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(10):2799-2806.
- [33] 张少民, 郝明德, 柳燕兰. 黄土区长期施用磷肥对冬小麦产量、吸氮特性及土壤肥力的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2007, 35(7):159-163.
- [34] 邢丹, 李淑文, 夏博, 等. 磷肥施用对冬小麦产量及土壤氮素利用的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(2):437-442.
- [35] 黄菊莹, 赖荣生, 余海龙, 等. N添加对宁夏荒漠草原植物和土壤C:N:P生态化学计量特征的影响[J]. 生态学杂志, 2013, 32(11):2850-2856.
- [36] 王飞, 林诚, 李清华, 等. 长期不同施肥下黄泥田土壤-水稻碳氮磷生态化学计量学特征[J]. 土壤通报, 2017, 48(1):169-176.
- [37] 张婷. 不同小麦品种氮磷效率及最佳氮磷养分投入差异研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.

(责任编辑:徐艳)